

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ НЕРУХОМИХ З'ЄДНАНЬ ПНЕВМАТИЧНИХ (АЕРОСТАТИЧНИХ) ПІДШИПНИКІВ ШЛЯХОМ КЕРОВАНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

Пневматичні (аеростатичні) підшипники посідають провідне місце в сучасних надпрецизійних системах – координатно-вимірювальних машинах, оптичних платформах, високоточних верстатах, установках для мікрообробки та мікропозиціонування. Їх переваги включають відсутність контактної тертя, стабільність руху, низький рівень вібрацій та відсутність забруднення мастильними матеріалами. Однак критичним елементом конструкції залишаються **нерухомі з'єднання** підшипника, що забезпечують геометричну базу та впливають на точність і стабільність газової плівки. Саме стан поверхневого шару цих з'єднань визначає якість підшипникової опори, її довговічність та робочу точність.

У дослідження закордонних науковців [1, 2] доведено, що навіть незначна деградація поверхневого шару нерухомих елементів спричиняє зміну товщини газової плівки, що призводить до похибок мікропозиціонування. Крім того, нерівномірність топографії поверхні може провокувати явище **пневматичного удару (pneumatic hammer)**, що різко знижує стабільність роботи підшипника та збільшує ризик аварійного контакту.

Зважаючи на це, розвиток методів **керованого відновлення поверхневого шару** і побудова **математичних моделей деградації та відновлення** є важливими завданнями для забезпечення довговічності та високої точності аеростатичних підшипників.

Поверхневий шар нерухомих з'єднань виконує роль базової конструкційної площини, на якій формується газова плівка. У

нормальних умовах товщина плівки становить 5–25 мкм та повинна забезпечувати високу однорідність шару. Навіть локальні дефекти або мікротріщини зі зміненою шорсткістю можуть змінити розподіл тиску і викликати нерівномірність навантаження.

Основними механізмами деградації поверхневого шару є:

- мікроабразивний знос при короткочасному контакті під час запуску або втрати тиску;
- адгезійний знос у разі забруднення повітряного потоку;
- утворення мікротріщин внаслідок циклічних навантажень і температурних перепадів;
- інтенсивне пластичне деформування у зонах локальних навантажень [3].

У роботі [1] авторами математично доведено, що навіть зміна геометрії в межах 1–3 мкм істотно впливає на модальні частоти системи «підшипник-навантаження». Це провокує перехід до нестійких режимів, у т. ч. появу «пневматичного удару».

З метою відновлення геометрії та підвищення довговічності застосовуються три групи технологій:

Металеві тонкошарові покриття:

- PVD-покриття (TiN, CrN), що забезпечують високу твердість (>20 ГПа);
- DLC задовільняють надвисоку твердість, низький коефіцієнт тертя (0,05–0,12);
- холодне газодинамічне напилення – відновлення без термодеформацій.

Тонкошарові покриття підвищують довговічність поверхні у 2–4 рази [4].

Лазерне наплавлення та мікроклатінг створюють рівномірний шар із високою адгезією, перевагою якого є точний контроль товщини (10–80 мкм) та геометрії.

Полімерні композити та анаеробні адгезиви застосовуються для відновлення посадок нерухомих з'єднань. Дослідження авторів [5] показали, що правильно підібраний склад компаунду забезпечує підвищення ресурсу відновленої посадки до 3 разів.

Для опису еволюції поверхневого шару застосовується модифікована модель Арчарда [6]:

$$\frac{dh}{dt} = D(t) - k \frac{F(t)v(t)}{H} f(R(t), T(t)),$$

де $h(t)$ – товщина відновленого шару, $D(t)$ – швидкість відновлення, $F(t)$, $v(t)$ – контактна сила та відносна швидкість, H – твердість матеріалу, $f(R, T)$ – залежність від шорсткості та температури.

Важливою складовою моделі є динамічний зв'язок між топографією поверхні та поведінкою газової плівки, що описується рівнянням Рейнольдса для стисливого середовища. Поєднання моделей зносу з машинним навчанням (XGBoost, Random Forest), дозволяє прогнозувати залишковий ресурс за експериментальними даними про шорсткість і навантаження.

Упродовж дослідження встановлено, що параметри шорсткості та мікроструктури поверхневого шару є критичними для стабільності газової плівки в аеростатичних підшипниках, а їх відхилення на рівні 1–3 мкм призводять до порушення тискового поля та підвищення ризику пневматичної нестабільності. Запропонована математична модель, що поєднує модифіковане рівняння Арчарда та рівняння Рейнольдса, дозволила прогнозувати інтенсивність зношування та залишковий ресурс поверхні нерухомих з'єднань.

Порівняльний аналіз технологій відновлення засвідчив високу ефективність надтвердих покриттів (DLC, CrN) та лазерного мікронаплавлення для забезпечення геометричної стабільності та низького коефіцієнта тертя. Доведено, що застосування методів керованого відновлення поверхневого шару може збільшити довговічність вузлів у 2–5 разів, що істотно підвищує надійність та точність роботи високоточних пневматичних опор.

Напрямом подальших досліджень є створення комплексної моделі керованого відновлення поверхневого шару нерухомих з'єднань пневматичних підшипників, яка інтегруватиме реальні експлуатаційні навантаження, динаміку газової плівки та еволюцію мікротопографії для прогнозування ресурсу та підвищення точності опор, розроблення інтегрованих моделей прогнозування зношування та оптимізації процесів відновлення поверхневого шару аеростатичних підшипників з урахуванням реальних експлуатаційних навантажень і динаміки газової плівки.

Список використаних джерел:

Rahmani F., Makki E., Giri J. Influence of Bearing Wear on the Stability and Modal Characteristics of a Flexible Rotor Supported on Powder-Lubricated Journal Bearings. *Lubricants*. 2023. Vol. 11, No. 9. P. 355. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants11090355>

Marchenko D., Matvyeyeva K. Study of the Stress–Strain State of the Surface Layer During the Strengthening Treatment of Parts. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27, No. 3(105). P. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-82-88>

Сорока М. О., Віштак І. В. Експлуатаційні показники нерухомих з'єднань підшипників під час їх роботи. *Наукові праці ВНТУ*. 2025. № 2. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/767> DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-2-232-238>

Wang X., Zhao W., Shi T., Cheng L., Hu S., Zhou C., Cui L., Li N., Liaw P. K. A Review on Tribological Wear and Corrosion Resistance of Surface Coatings on Steel Substrates. *Coatings*. 2025. Vol. 15, No. 11. P. 1314. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings15111314>

Toirov I., Kholmatov R., Mamatkulov A. Theoretical prerequisites for improving durability of fixed rolling bearing joints restored with anaerobic compounds. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 365. Article 04020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336504020>

Rezaei A., Van Paeppegem W., De Baets P., Ost W., Degrieck J. Adaptive finite element simulation of wear evolution in radial sliding bearings. *Wear*. 2012. Vol. 296, No. 1–2. P. 660–670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.08.013>